

激光与光电子学进展

千瓦级激光器叠阵单巴条激光参量测试技术

田永昊^{1,2}, 白芳¹, 麻云凤^{1,2*}, 程旺¹, 郭广妍¹, 张思楠^{1,2}, 殷晨轩^{1,2}, 赵鹏¹, 姜南¹, 樊仲维¹

¹中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 提出了一种千瓦级半导体激光器叠阵中单巴条的激光功率和光谱参量的集成测试技术。利用自主研发的光阑将激光器叠阵中任意单巴条的光束与其他巴条的光束分离, 并利用积分球对分离出的单巴条光束的功率和光谱参量进行集成测试, 再与整个激光器叠阵的功率和光谱参量的集成测试结果进行比对。实验结果表明: 利用自主研发的光阑实现了将 1 kW 激光器叠阵中任意单巴条光束与其他巴条光束的分离, 光阑对单巴条光束的透过率为 98%; 结合积分球集成测试系统实现了激光器叠阵中所有巴条的单独测试, 解决了激光器叠阵中单巴条测试需要拆封的传统问题。此外该系统实现了对整个激光器叠阵的快速扫描测试, 可直观反映激光器叠阵中每个巴条的情况。

关键词 测量; 二极管激光器阵列; 激光光束特性; 积分球

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2312004

Laser Parameter Measurement Technology of Kilowatt Stack Laser Based on Integrating Sphere

Tian Yonghao^{1,2}, Bai Fang¹, Ma Yunfeng^{1,2*}, Cheng Wang¹, Guo Guangyan¹, Zhang Sinan^{1,2}, Yin Chenxuan^{1,2}, Zhao Peng¹, Jiang Nan¹, Fan Zhongwei¹

¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An integrated technique for measuring the laser power and spectral parameters of a single bar in a kilowatt class semiconductor laser array is proposed. The beam of any single bar in the laser array is separated from the beam of other bars by the self-developed diaphragm, and the power and spectral parameters of the separated single bar beam are integrated tested by using the integrating sphere, and then compared with the results of the integrated test of the power and spectral parameters of the whole array. The experimental results show that any single bar beam in the 1 kW laser array can be separated from other bar beams by the self-developed diaphragm, and the transmittance of the diaphragm to the single bar beam is 98%. Combining with the integrating sphere integrated test system, all the bars in the laser array can be tested individually, which overcomes the traditional problem of unpacking the single bar in the stack array. In addition, the system can scan the whole stack quickly and reflect each bar in the stack directly.

Key words measurement; diode laser arrays; laser beam characterization; integrating sphere

OCIS codes 120.3150; 140.2010; 140.3295; 040.1880

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-03-22; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目(YTKYYQ20180043)、中国科学院青年创新促进会(2017195)、国家重点研发计划(2018YFB1107305)

通信作者: *mayf100612@aircas.ac.cn

1 引言

半导体激光器叠阵是由多个巴条封装而成的,是半导体激光器实现大功率激光输出的一种重要方式^[1-2]。半导体激光器叠阵依据输出功率和光谱等参量特性,并凭借着亮度高、寿命长、质量轻、体积小等优点广泛应用于工业加工^[3]、医疗^[4]、美容^[5-6]、科研^[7-11]、军事^[12]等领域。半导体激光器叠阵因其特殊构造,容易出现巴条失效的问题。因此需要确定激光器叠阵中每个巴条的输出特性,尤其是功率和光谱特性。并且激光器叠阵的巴条间距较小、排列紧密,且封装结构复杂。因此,研究半导体激光器叠阵中单巴条的测试技术具有重要意义。

半导体激光器叠阵具有功率高、发散角和光斑较大的特点^[13],而常规探测器的损伤阈值较低,探测面积有限,往往无法对高功率半导体激光器叠阵进行直接测量^[14]。已有的间接测量方法有:发散角和光斑较大时,先利用透镜将光束聚焦再测量^[15];功率较高时,先利用分光、衰减元件对光束能量进行衰减再测量^[16]等。然而高功率激光参量测试系统中过多的光学元件会极大地影响高功率激光的光束特性,从而导致较大的测量误差。采用积分球作为分光元件^[17-21]结合光谱仪、功率计或者光电探测器进行集成测试的方法,具有较高的测量精度,尤其适用于功率高且发散角和光斑较大的激光器叠阵的参量集成测试。

此外,激光器叠阵封装结构复杂不易拆封,面临着失效巴条难以监测等问题。已有的单巴特性的测试往往采用的是单独封装的方式^[17,22]。对激光器叠阵中单巴条的单独测试可以利用一个具有特定宽度的狭缝光阑将单巴条光束与其他巴条的光束分离开再进行测试。有研究者采用两个棱镜对组成的狭缝^[15],也有采用刀口狭缝并通过移动和调节狭缝的位置和缝宽实现单巴条测试^[16],这两种由两个独立光学元件组合而成的狭缝需要调节各元件的位置和角度等参数,操作不便,容易有较大误差。

为了精确测量高功率半导体激光器叠阵单巴条的功率和光谱参量特性,本文提出了一种千瓦级半导体激光器叠阵中单巴条的激光参量测试技术。利用自主研发的光阑^[13]将激光器叠阵中任意单巴条的光束与其他巴条的光束分离,并利用积分球对分离出的单巴条光束的功率和光谱参量进行集成

测试,再与整个叠阵的功率和光谱参量的集成测试结果进行比对。实验结果表明:自主研发的光阑可实现对叠阵中任意巴条的单独测试,解决了叠阵中单巴条测试需要拆封的传统问题。同时该系统实现了对整个激光器叠阵中所有巴条的快速扫描测试,直观地反映了叠阵中每个巴条的情况,具有快速、高效、准确等优点,尤其适用于叠阵规模化的质量检测 and 故障监测。

2 实验原理与装置

自主研发的光阑结构如图 1 所示。光阑主要是由两个反射镜和两侧热沉固定封装而成,其中,反射镜和热沉内部均设有水冷通道,目的是承受高功率激光照射,两反射镜是由表面镀金镜面处理的紫铜材料制成(透射率为零),两反射镜之间形成狭缝,狭缝宽度可调,便于不同发散角激光器叠阵的单巴条测试。该光阑的作用是仅允许激光器叠阵中待测单巴条的光束完全通过狭缝,而其他巴条的光经反射镜反射至两侧热沉被完全吸收冷却。

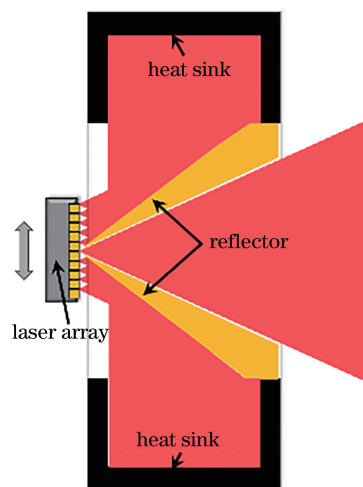


图 1 光阑原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the diaphragm

光阑设计原理如图 2 所示。为了保证该狭缝光阑可以实现激光器叠阵中单巴条光束与其他巴条光束的完全分离,即仅允许待测单巴条光束完全通过光阑狭缝,而其他巴条的光束则经两反射镜反射至两侧热沉被完全吸收冷却,需要在多个巴条发出的光束出现交叠之前将待测单巴条的光束分离,如图 2(a) 所示,光阑的狭缝宽度 b 和光阑与激光器叠阵的距离 d 之间的关系如下:已知待测激光器叠阵的巴条间距 a ,光束的快轴发散角为 θ ,则在光束交

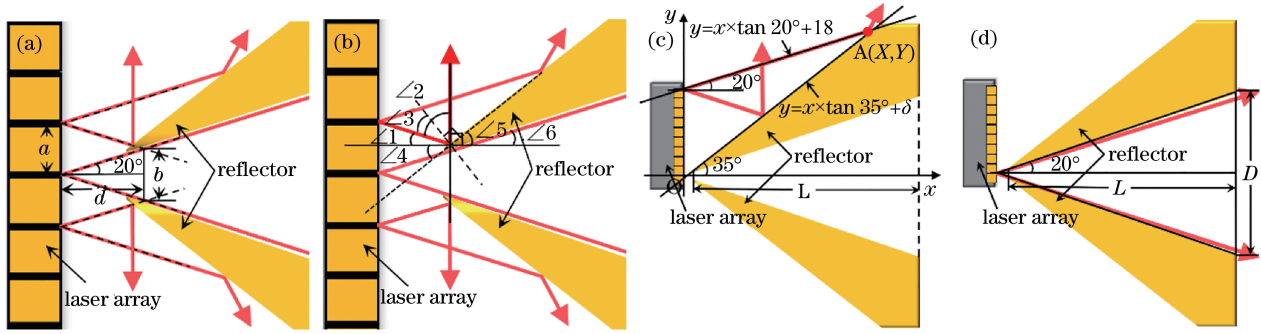


图2 光阑设计原理图。(a)光阑与激光器阵列距离及光阑缝宽;(b)光阑反射镜上、下表面角度;(c)光阑宽度;(d)光阑出口大小
Fig. 2 Diaphragm design schematic. (a) Distance between the aperture and the laser array and the aperture gap width; (b) angles of the upper and lower surfaces of the apertures; (c) aperture width; (d) size of aperture outlet

叠临界处有： $b = a, d = \frac{a}{2} \times \cot\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ，因此，可以调节光阑缝宽为 b ，光阑与激光器阵列之间的距离小于 d 。

此外，为了保证经光阑反射镜反射的光束不会被反射到激光器叠阵表面而损伤激光器，依据激光器叠阵的发散角设定反射镜安装角度，使反射光全部进入热沉，如图 2(b) 所示，则 $\angle 1 = \frac{\theta}{2}$ ， $\angle 2 = \frac{\pi - \theta}{2}$ ，因此 $\angle 3 = \frac{\angle 2}{2} = \frac{\pi - \theta}{4}$ ， $\angle 4 = \frac{\pi}{2} - \angle 1 - \angle 3 = \frac{\pi - \theta}{4}$ ，则 $\angle 5 = \angle 4 = \frac{\pi - \theta}{4}$ ，即：反射镜的上表面与水平方向的夹角为 $\frac{\pi - \theta}{4}$ 。同时，为了保证单巴条的光束完全通过光阑，光阑的下表面角度 $\angle 6$ 应不小于光束快轴半角发散角 $\frac{\theta}{2}$ ，因此可取 $\angle 6 = \frac{\theta}{2}$ ，即：反射镜的下表面与水平方向的夹角为 $\frac{\theta}{2}$ 。另外，当光阑狭缝与最后一个巴条的发光区对齐时，要保证最上方巴条发出的光束仍能被反射镜表面反射，因此要界定光阑的最小宽度，光阑宽度的设计原理如图 2(c) 所示，以最后一个巴条的发光区位置为坐标原点 O ，水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴，建立直角坐标系，则反射镜表面所在直线为 $y = x \times \tan\left(\frac{\pi - \theta}{4}\right) + \delta$ ，其中， δ 与光阑和激光器叠阵之间的距离 d 有关，最上方巴条光束的上边缘光线所在直线为 $y = x \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + n \times a$ ，其中 n 为激光器叠阵中巴条总数，由两直线方程联立求得交点 A 的横坐标 X ，即为光阑宽度 L 的最小值。

本实验选用激光器叠阵的中心波长典型值为 808 nm、中心波长偏差为 ± 3 nm、输出平均功率为 1000 W、巴条数量为 10（垂直封装）、巴条间距为 1.8 mm、快轴发散角 $\leq 40^\circ$ ；选用积分球的直径为 300 mm，入光孔直径为 60 mm，一个出光孔直径为 25.4 mm，另一出光孔安装 SM1 转接头，两出光孔中心与球心连线夹角为 120° ，对称分布在入光孔同半球两侧；选用光阑的狭缝宽度为 1.8 mm、反射镜上下表面倾角分别为 35° 和 20° ，光阑宽度为 60 mm。

2.1 激光器叠阵的功率和光谱测试装置

激光器叠阵的功率和光谱测试实验方案如图 3 所示，激光器叠阵安装在电动升降台上，功率计（型号 UP19K-60H-H5-INT-D0，探头口径为 19 mm）和光谱仪（型号 ULS3648-USB2，测试精度为 0.5 nm）分别安装在积分球的两个输出口上。激光器叠阵的输出激光束直接经积分球入光孔进入积分球，经积分球内壁的多次漫反射匀化后，经两出光孔出射到达功率计和光谱探头。

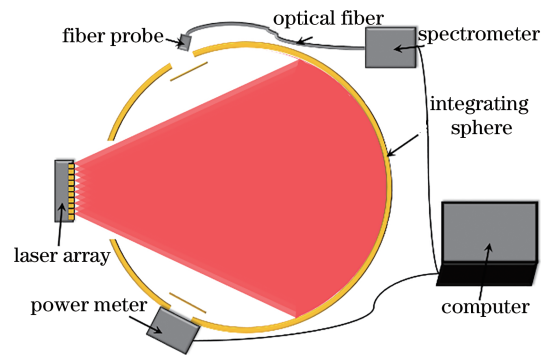


图3 1 kW 激光器叠阵输出激光的功率和光谱的集成测试装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of integrated test device for power and spectrum of 1 kW laser array output laser

2.2 激光器叠阵单巴条的功率和光谱测试装置

激光器叠阵单巴条的功率和光谱测试实验方案如图 4 所示,激光器叠阵安装在电动升降台上,激光器叠阵的发光面与光阑狭缝的距离小于 d 。通过软件控制电动升降台升降步长(精度为 $0.78 \mu\text{m}$)从而精确控制激光器叠阵中各巴条发光区和光阑狭缝中心对齐,使激光器叠阵中与狭缝对齐的单巴条的光束完全通过狭缝而其他巴条的光束经狭缝两侧反射镜反射至两端的热沉被完全吸收冷却。通过光阑的单巴条光束进入积分球,利用积分球上的功率计和光谱仪进行功率和光谱测试。

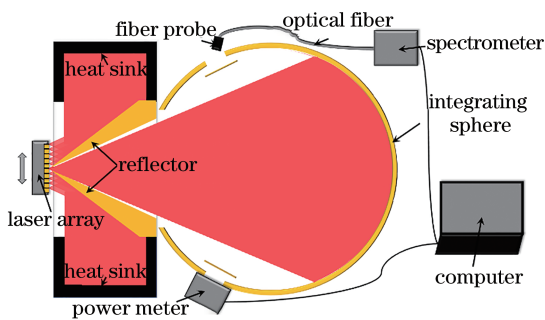


图 4 1 kW 激光器叠阵单巴条输出激光的功率和光谱的集成测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of integrated test device for power and spectrum of a single bar output laser of 1 kW laser array

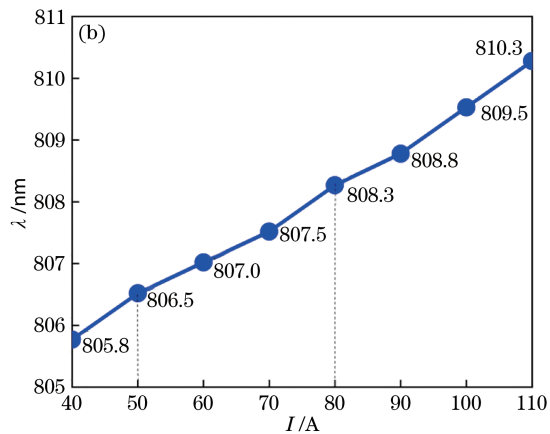
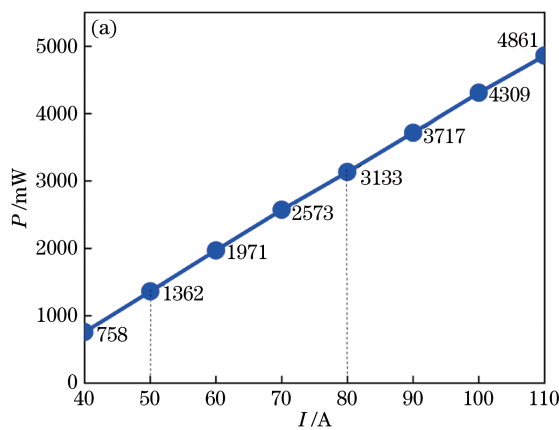


图 5 1 kW 激光器叠阵输出激光功率和光谱的集成测试结果。(a)功率;(b)光谱

Fig. 5 Integrated test results of output laser power and spectrum of 1 kW laser array. (a) Power; (b) spectrum

3.2 激光器叠阵单巴条的功率和光谱测试结果

激光器叠阵 10 个巴条输出激光功率和光谱参量的积分球集成测试结果如图 6 所示。图 6(a)~(c)分别为电流 $I=110 \text{ A}$ 、 $I=80 \text{ A}$ 、 $I=50 \text{ A}$ 时 10 个巴条的积分球测得功率值,除巴条 1 和 4 功率值略低外,其他巴条的功率值较为相近,均约为激

3 实验结果

3.1 激光器叠阵的功率和光谱测试结果

激光器叠阵输出激光的功率和光谱参量的积分球集成测量结果如图 5 所示。如图 5(a)所示,在 $40 \text{ A} \leq I \leq 110 \text{ A}$ 范围内,激光器叠阵的输出激光的功率-电流曲线(P - I 曲线)呈良好线性,其中,在电流 $I=110 \text{ A}$ 、 $I=80 \text{ A}$ 、 $I=50 \text{ A}$ 时,对应的激光器叠阵功率的积分球测试结果分别为 $P=4861 \text{ mW}$ 、 $P=3133 \text{ mW}$ 、 $P=1362 \text{ mW}$ 。激光器叠阵的中心波长 λ 与电流 I 的关系如图 5(b)所示,基本符合线性变化规律,中心波长的积分球测量结果与待测激光器叠阵中心波长(808 ± 3) nm 符合,证明该测量结果是真实有效的。经分析光谱测量结果不是良好的线性的原因有两点:一个是光谱仪的测量精度 (0.5 nm) 的影响,另一个是激光器叠阵输出激光的波长受激光器温度影响出现漂移(实验过程中证明了同样电流下激光器波长随温度漂移最大约为 1 nm)。为了进一步提高激光器叠阵光谱参量的测量精度,可以通过选用更高测量精度的光谱仪,以及选用更稳定的冷却方式控制激光器叠阵的温度,从而减小激光器波长随温度的浮动。综上实验结果表明:基于积分球的激光器叠阵的功率和光谱参量的集成测试方案真实有效。

器叠阵的积分球测得功率值的十分之一。在电流分别为 $I=110 \text{ A}$ 、 $I=80 \text{ A}$ 、 $I=50 \text{ A}$ 时,对应的 10 个巴条的积分球测得功率值之和分别为 $P_{\text{total}}=4762 \text{ mW}$ 、 $P_{\text{total}}=3128 \text{ mW}$ 、 $P_{\text{total}}=1412 \text{ mW}$,该值与对应的激光器叠阵的积分球测得功率值 $P=4861 \text{ mW}$ 、 $P=3133 \text{ mW}$ 、 $P=1362 \text{ mW}$ 的比值,

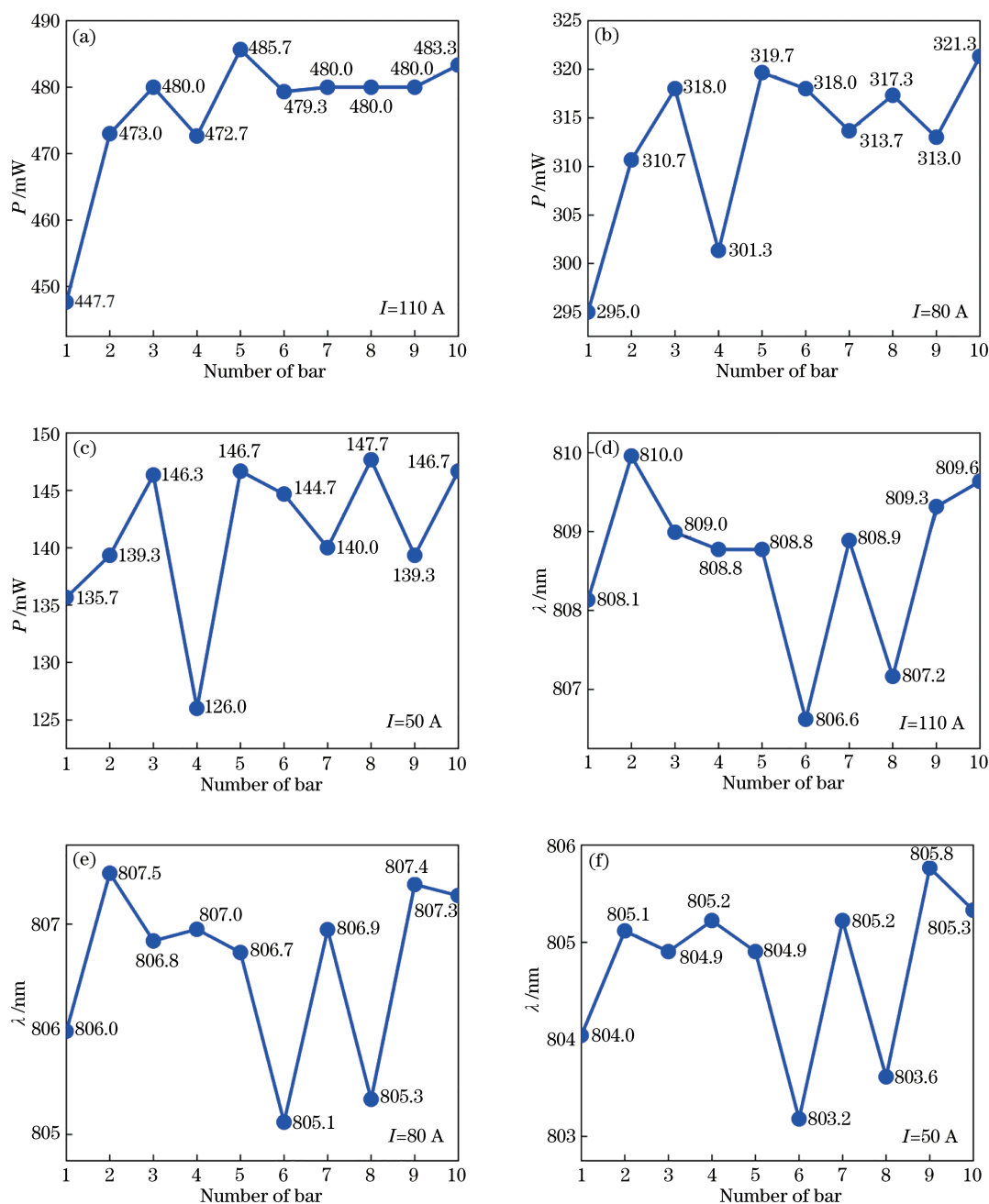


图 6 1 kW 激光器叠阵的 10 个巴条输出激光功率和光谱的集成测试结果。(a)~(c) $I=110\text{ A}$ 、 $I=80\text{ A}$ 、 $I=50\text{ A}$ 时的功率结果；(d)~(f) $I=110\text{ A}$ 、 $I=80\text{ A}$ 、 $I=50\text{ A}$ 时的光谱结果

Fig. 6 Integrated test results of laser power and spectrum of 10 bars of 1 kW laser array. (a)~(c) Power results when $I=110\text{ A}$, $I=80\text{ A}$, and $I=50\text{ A}$; (d)~(f) spectrum results when $I=110\text{ A}$, $I=80\text{ A}$, and $I=50\text{ A}$

即光阑对单巴条光束的透过率分别为 $T=0.980$ 、 $T=0.999$ 、 $T=1.037$ 。在电流 $I=50\text{ A}$ 时 $T=1.037>1$ ，经分析出现该结果的原因可能是本文选用的功率计的量程下限为 100 mW，在电流较小也即激光器输出功率较低时，功率计接收到的功率值接近其量程下限则读数偏大导致的。由于在电流较大时透过率均小于 1，因此排除了相邻巴条的部分光束通过光阑参与了单巴条的功率测试的

可能性，也就是说，利用该自研光阑实现激光器叠阵单巴条光束的分离测量是有效的。图 6(d)~(f) 分别为电流 $I=110\text{ A}$ 、 $I=80\text{ A}$ 、 $I=50\text{ A}$ 时 10 个巴条的积分球测得光谱结果，测试结果表明：巴条 6 和 8 的光束波长较短。综上实验结果表明：该自研的光阑应用于激光器叠阵的单巴条光束分离测试具有良好的可行性。

另外，通过软件控制激光器叠阵底座的电动升降

台,实现了整个激光器叠阵中所有巴条的快速扫描测试。激光器叠阵中 10 个巴条的功率快速扫描测试曲线如图 7 所示,图 7(a)和(b)分别是控制电动升降台自下向上和自上向下两个相反方向匀速移动过程中激光器叠阵的 10 个巴条在电流分别为 $I=110\text{ A}$ 、 $I=80\text{ A}$ 、 $I=50\text{ A}$ 时的积分球测得功率值的扫描测试曲线。每个波峰对应着每个巴条的发光区与光阑的狭缝中心对齐时的积分球测得功率值。从图中可以

发现,两个相反移动方向的波形具有良好的对称性,且三条扫描曲线具有基本一致的波形。从扫描曲线中也可以发现,巴条 1 和 4 对应的波峰较低,即巴条 1 和 4 的功率较低。综上实验结果表明:该快速扫描测试的结果是可信的。由于快速扫描测试方案无需每个巴条发光区与光阑狭缝的精准对齐,具有快速、准确、高效的优点,对激光器叠阵中每个巴条的功率情况监测具有良好的参考意义。

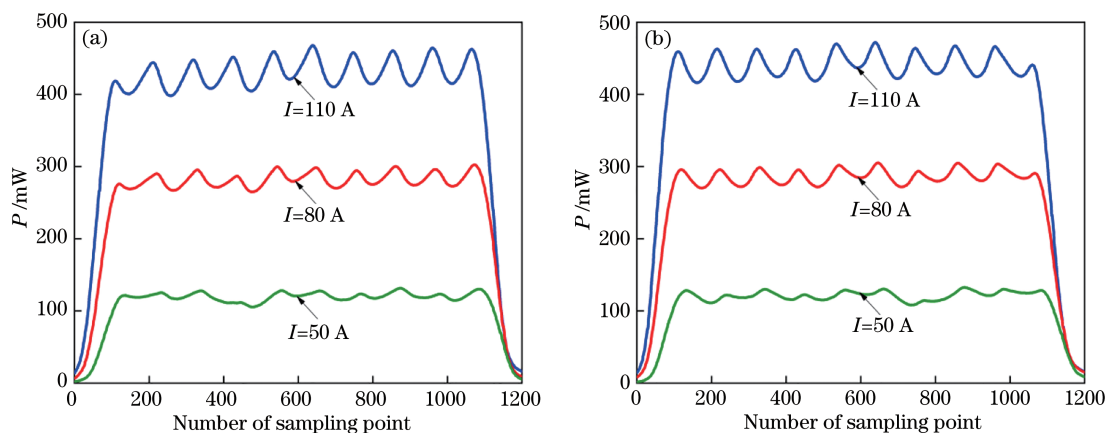


图 7 激光器叠阵的 10 个巴条功率扫描测试结果。(a)从下向上移动;(b)从上向下移动

Fig. 7 Power scan test results of 10 bars of laser array. (a) Move from bottom to top; (b) move from top to bottom

4 结 论

针对高功率激光器叠阵的激光参量测试的两大难题:一个是输出激光束的功率高、发散角和光斑都较大,现有的探测器往往无法进行直接测试;另一个是激光器叠阵的封装结构复杂不易拆封和巴条间距较小等造成的激光器叠阵中单巴条单独测试困难,本文提出了一种基于积分球的千瓦级半导体激光器叠阵中单巴条输出激光的功率和光谱参量测试技术。利用积分球作为分光元件,解决了高功率、大发散角和大光斑激光的测试问题,实现了 1 kW 激光器叠阵的功率和光谱参量的集成测试。结合自研的光阑,实现了无需拆封即可对激光器叠阵中每个巴条进行单独测试,同时使用高精度电动升降台,实现了激光器叠阵中所有单巴条的快速扫描测试。相比于现有的激光器叠阵单巴条测试方法,本文提出的技术方案方便、准确、快捷,同时具有集成化测试等优点。该技术方案尤其适用于高功率激光器叠阵的规模化质量检测和故障监测。

针对不同发散角和巴条间距的激光器叠阵,对光阑的参数要求不同。本文提出的自研光阑采用了固定封装结构,是为本文选用的待测激光器叠阵

量身定制的。对于不同发散角和巴条间距的激光器叠阵的单巴条测试需要根据本文给出的设计原理设定不同的光阑参数,为了使得光阑适用于多种垂直封装的激光器叠阵,可以将光阑中的反射镜的长度加大,并且将两反射镜设置为在垂直于纸面方向可设定角度转动,以及平行于纸面方向设定距离移动,所有的调整都要保证两光阑形成的狭缝是等宽度水平的,并且狭缝位于光阑的前表面,以便于控制狭缝与激光器叠阵的发光面之间的距离尽可能小,从而使得单巴条的光束尽可能完全通过光阑,而其他巴条的光束被尽可能完全地阻挡。本文提出的方案具有较高的适用性,对于发散角很大而巴条间距很小的激光器叠阵可以尝试对每个巴条先加微透镜进行适当聚焦或者准直,使得各巴条的光束在一定距离外交叠,从而便于采用本文提出的方案进行分离测量。

参 考 文 献

- [1] Bo B X, Wang L, Qu Y, et al. 808 nm wavelength high power semiconductor laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(6): 494-496.
薄报学, 王玲, 曲轶, 等. 808 nm 波长高功率阵列半

- 导体激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 494-496.
- [2] Zhou M C, Jiang X F, Zhang L F, et al. Optical performance of high power laser diode stack[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12): 1202004.
周旻超, 江先锋, 张丽芳, 等. 大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202004.
- [3] Hu Z, Shao L F, Li C, et al. Study on the technique for measuring the peak power of narrow pulsed semiconductor laser arrays[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(6): 670-674.
胡峥, 邵莉芬, 李川, 等. 窄脉冲阵列激光器峰值功率测试的研究[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 670-674.
- [4] Espinoza A, Petasecca M, Fuduli I, et al. The evaluation of a 2D diode array in "magic phantom" for use in high dose rate brachytherapy pretreatment quality assurance[J]. Medical Physics, 2015, 42(2): 663-673.
- [5] Cai L. Design of optical treatment head with semiconductor laser for medical hair removal[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
蔡磊. 医疗脱毛半导体激光器光学治疗头设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- [6] OFweek. Huaguang optoelectronics launches 1600 W macro channel stacked array laser [EB/OL]. (2019-06-24)[2021-03-10]. <https://laser.ofweek.com/2019-06/ART-240002-8220-30394489.html>.
- [7] Liu C, Yu J, Fan Z W. Light collecting characteristics of Nd:YAG ceramic condenser chamber unilaterally pumped by laser stacked array [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0301001.
刘畅, 余锦, 樊仲维. 激光二极管叠阵单侧抽运 Nd:YAG 陶瓷聚光腔的聚光特性[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0301001.
- [8] Sun S J, Tan H, Meng H C, et al. Coupler free grating external cavity spectral beam combining of diode laser stacks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001007.
孙舒娟, 谭昊, 孟慧成, 等. 半导体激光器叠阵无输出耦合镜光栅外腔光谱合束[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001007.
- [9] Liu F H, Gong X, Zhang Y N, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120001.
刘芳华, 龚鑫, 张雅楠, 等. 808 nm 垂直腔面发射激光器阵列抽运的全固态激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 120001.
- [10] Zhang W Q, Liu Y, Chen N J, et al. Laser diode double-pass double-end pumped Yb:YAG slab laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1101007.
张伟桥, 刘洋, 陈念江, 等. 激光二极管双端双程抽运 Yb:YAG 板条激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1101007.
- [11] Wang H, Zhang R K, Lu D, et al. 1.55 μm high-power high-speed directly modulated semiconductor laser array[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0914001.
王皓, 张瑞康, 陆丹, 等. 1.55 μm 大功率高速直调半导体激光器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0914001.
- [12] Feng A, Le X Y, Zhang X F. Research progress on laser device used in laser target designator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 010002.
冯傲, 乐小云, 张小富. 用于目标指示器的激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 010002.
- [13] Liao L F, Ma Y F, Chen W, et al. A device and method for measuring power and stability of a single bar in a laser diode stack array: CN107144423A[P]. 2017-09-08.
廖利芬, 麻云凤, 程旺, 等. 一种激光二极管叠阵中单巴条功率与稳定性测量装置及方法: CN107144423A [P]. 2017-09-08.
- [14] Boucke K, Jandeleit J, Brandenburg W, et al. Packaging and characterization equipment for high-power diode laser bars and VCSELs[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4285: 165-172.
- [15] Roehner M, Muentz H, Schroeder O, et al. Characterization device for diode-laser-stack beam propagation[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4932: 608-614.
- [16] Guo L H, Lü W Q, Gao S X, et al. Measurement of the collimated beam pointing among bars for diode laser vertical stack[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(1): 11-14.
郭林辉, 吕文强, 高松信, 等. 垂直阵列 DL 巴间准直光束指向精度测量方法[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 11-14.
- [17] Roehner M, Boucke K, Poprawe R. Characterization device for measuring beam parameter product and beam quality of collimated and uncollimated diode lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6101: 61011B.
- [18] Chen X, Tang S X, Hui H C, et al. High power

- laser multi-parameter measurement technique based on integrating sphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0804002.
- 陈欣, 唐顺兴, 惠宏超, 等. 基于积分球的高功率激光多参数测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0804002.
- [19] Han K, Xi X M, Wang X L, et al. High-power fiber laser parameter integrated synchronous test device: CN109211524A[P]. 2019-01-15.
- 韩凯, 奚小明, 王小林, 等. 大功率光纤激光器参数一体化同步测试装置: CN109211524A[P]. 2019-01-15.
- [20] Mikhailovich R A, Vladimirovich U M. A device for measuring the radiated power of a laser over an extended spectral range: RU184833U1[P]. 2018-12-11.
- [21] Liu X S, Zhao W, Xiong L L, et al. Testing and characterization of high power semiconductor lasers [M]//Packaging of high power semiconductor lasers. Micro- and opto-electronic materials, structures, and systems. New York: Springer, 2014: 227-286.
- [22] Ling X H, Cui B F, Zhang S, et al. Failure analysis of 980 nm large-optical-cavity single light bar high-power LD[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 369-372.
- 凌小涵, 崔碧峰, 张松, 等. 980 nm 大光腔单发光条大功率 LD 失效分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 369-372.